

後期音のレベルおよび方向特性が音に包まれた感じに与える影響

Effects of Total Level and Arrival Direction of Late Sound on Listener Envelopment

和久田晃子*, 中野雄介**, 古屋 浩***, 藤本一壽****, 穴井 謙****

Akiko WAKUDA, Yusuke NAKANO, Hiroshi FURUYA,

Kazutoshi FUJIMOTO and Ken ANAI

The purpose of this study is to clarify the effect of late arriving sound on listener envelopment (LEV). In our previous work, it was shown that late sounds from above and behind the listener as well as lateral significantly affected LEV when the ratio of early-to-late sound energy (C_{80}) was constant. In this paper, a psychological experiment is performed with simulated sound fields in order to examine the relation between C_{80} and directional late energy ratios, and perceived LEV. The result shows that the contribution of C_{80} to LEV is the highest in the negative. This means that LEV increases as the late energy increases. Furthermore, late overhead and back energy ratios are definitely effective for LEV at the rate of approximately 35 to 62 percent of the effect of lateral energy ratio.

Keywords : Concert hall acoustics, Listener envelopment, Directional late energy ratio, Ratio of early-to-late sound energy, Psychological experiment

コンサートホール音響, 音に包まれた感じ, 方向別後期音エネルギー率, 初期音/後期音エネルギー比, 心理実験

1. はじめに

コンサートホールの音場を評価する重要な心理的要因の一つ“拡がり感”(Spatial impression)には見かけの音源の幅(ASW)と音に包まれた感じ(LEV)の二つの性質があることが近年明らかにされ, ASWは初期音と, LEVは後期音と関連が深いことが一般に認知されつつある。

LEVに関しては, Bradleyら¹⁾が従来の側方エネルギー率に代えて絶対音圧レベルと空間情報の両方を表現できるLG(後期側方反射音レベル)を評価指標として提案しており, また, 側方以外の空間情報を取り込んだ指標として, 森本ら²⁾による前後エネルギー比なども提案されている。しかし, これらの指標はいずれも平面的な音場を用いて導出されたものであり, 実際のコンサートホールのような3次元的な音場に適用したときの有効性は明らかではない。

そこで筆者らは, 側方以外から到来する後期音を含む3次元的な模擬音場を用いた一連の心理実験を行い, 後期音

の到来方向がLEVに与える影響について検討してきた。まず, 側方, 前方, 上方, 後方の4つの方向から到来する後期音のレベル変化がLEVへ与える影響を検討し, 側方反射音だけでなく上方並びに後方から到来する後期音レベルもまたLEVと正の相関関係にあること, 方向別後期音レベルのLEVに対する影響の度合いは, 側方, 後方, 上方, 前方の順に大きいことを明らかにした³⁾。さらに, 後期音エネルギーの到来方向分布とLEVの関係を調べるために, 初期音/後期音エネルギー比 C_{80} を一定として方向別後期音エネルギー率の変化がLEVへ与える影響を検討した。その結果, 側方後期音エネルギー率の寄与が最も大きいこと, 後期音エネルギーの初期音エネルギーに対する割合が大きい場合には後方並びに上方後期音エネルギー率の寄与は側方エネルギー率の3~5割であることを示した⁴⁾。以上のことから, 側方成分を持たない後方や上方から到来する後期音もまたLEVに寄与することを示すとともに, C_{80} を一定とした場合の方向別後期音エネルギー率のLEVへの寄与の度合いを明らかにした。

LEVには, 後期音の到来方向分布だけではなく初期音エネルギーに対する後期音エネルギーの割合も寄与すると考えられる。そこで本研究では, 後期音の到来方向分布だけで

* 空間システム専攻博士後期課程

** 空間システム専攻修士課程

*** 九州共立大学

**** 都市・建築学部門

はなく C_{80} も併せて変化させた刺激を用いた心理実験を行い、側方、後方、上方の各方向別後期音エネルギー率並びに C_{80} が LEV に与える影響について検討した。

2. 心理実験

2.1 実験方法

実験は無響室内において行った。半径 1.5m の半球面上に配置されたスピーカ群から刺激対を提示し、頭を固定して座らせた被験者に対比較法により音に包まれた感じの評価を求めた。スピーカの配置を Fig. 1 に示す。スピーカシステムは直接音用スピーカ 1 個、初期音用スピーカ 2 個 (前方斜め 45°)、並びに後期音用スピーカ 5 個 (側方 2 個、前方 1 個、後方 1 個 (以上水平面内)、上方 1 個) で構成されている。

音源信号は無響室録音された「アルルの女」(Bizet 作曲) の約 10 秒間である。全刺激対は MIDI 制御されたシステムによりランダムに呈示した。

2.2 刺激音場

刺激のインパルス応答は、直接音、6 本の初期反射音 ($t = 0 \sim 80\text{ms}$, $LE=0.17$) 並びに 4 方向からの後期音 ($t = 80 \sim \infty\text{ms}$) から成り、直接音並びに初期音は全刺激で一定である。また、残響時間は 1.8 秒である。刺激音場の構成を Fig. 2 に示す。

後期音エネルギーの方向成分を規定する物理量として、側方後期音エネルギー率 LE_{late} (late: $t = 80 \sim \infty\text{ms}$, 以下同様)、上方後期音エネルギー率 VE_{late} 、後方後期音エネルギー率 BE_{late} 並びに前方後期音エネルギー率 FE_{late} を (1) 式のように定義した。これらは、全後期音エネルギーに対する各方向成分エネルギーの割合である。

$$\begin{aligned} LE_{\text{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty L}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ VE_{\text{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty V}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ BE_{\text{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty B}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \\ FE_{\text{late}} &= \int_{80}^{\infty} p_{\infty F}^2(t) dt / \int_{80}^{\infty} p^2(t) dt \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $p(t)$, $p_{\infty}(t)$ は、各々無指向性マイクロフォン、双指向性マイクロフォンの出力音圧である。

刺激音場は、 C_{80} 並びに側方、後方、上方、前方から到来する後期音エネルギーの割合を変化させた計 20 個とした。 C_{80} 並びに方向別後期音エネルギー率の変化幅は、各々、 $-5 \sim +5\text{dB}$, $0.05 \sim 0.81$ とした。20 個の刺激を Table 1 に示す。刺激の呈示音圧レベル (Binaural SPL⁵) は 63 dB で一定である。

2.3 被験者

被験者は建築学を専攻している 20~23 才の学生 14 名である。実験に先立ち、被験者には教示文および概念図を

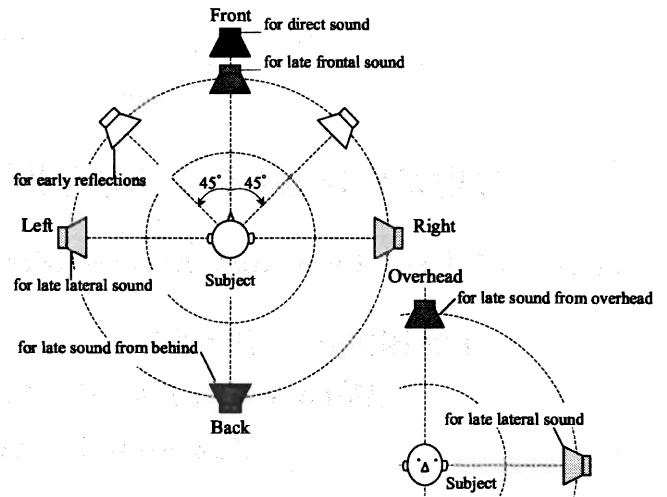


Fig. 1 Arrangement of loudspeakers in an anechoic chamber.

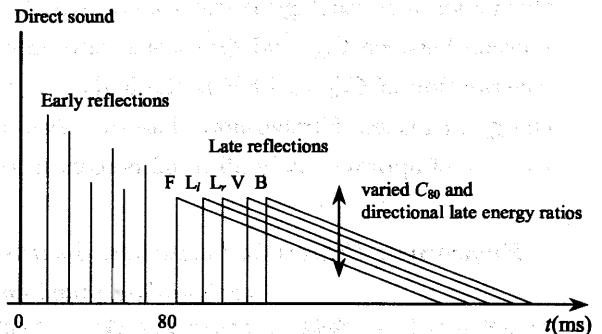


Fig. 2 Structure of the sound fields used in the experiment (F=frontal, L=lateral, V=overhead, and B=behind; subscripts l and r : left and right).

用いて“音に包まれた感じ”の説明を行うとともに、数個の刺激による練習を行った。実験では 20 個の音場のすべての組み合わせ (190 対) を刺激対とし、各人に同一刺激対を 4 回ずつ判断させた。

3. 結果と考察

3.1 実験結果

得られた回答から Thurstone Case V に基づき心理的距離尺度を構成した。モデルの適合度の検定を行った結果、有意水準 5% で事実に適合していた。一意性並びに一致性の検定の結果は、いずれも有意水準 5% で有意であった (14 名 × 4 回 = 56 回分)。

距離尺度と C_{80} 並びに前方を除く方向別後期音エネルギー率 LE_{late} , BE_{late} , VE_{late} の関係を Fig. 3 に示す。ここで、筆者らによるこれまでの実験から、前方後期音の LEV への影響は小さいという結果が得られているため、以下では前方後期音エネルギー率 FE_{late} に関する考察は行わない。

Table 1 Twenty sound fields used in the experiment.

Stimulus No.	BSPL(dB)	C_{80} (dB)	Directional late sound energy ratio			
			LE_{late}	VE_{late}	BE_{late}	FE_{late}
1		-4.9	0.10	0.59	0.10	0.18
2		-4.5	0.19	0.41	0.23	0.15
3		-4.1	0.43	0.08	0.29	0.10
4		-3.4	0.10	0.81	0.05	0.05
5		-2.9	0.09	0.21	0.59	0.10
6		-2.4	0.31	0.10	0.51	0.05
7		-1.9	0.44	0.39	0.15	0.05
8		-1.2	0.22	0.10	0.05	0.65
9		-0.9	0.10	0.10	0.72	0.05
10	63	-0.3	0.32	0.19	0.10	0.41
11		0.3	0.18	0.69	0.05	0.05
12		0.8	0.09	0.32	0.21	0.41
13		1.2	0.65	0.29	0.05	0.05
14		1.5	0.26	0.29	0.28	0.09
15		2.3	0.20	0.55	0.15	0.05
16		2.6	0.17	0.16	0.55	0.05
17		3.1	0.15	0.54	0.09	0.20
18		3.7	0.10	0.42	0.40	0.11
19		4.5	0.60	0.20	0.11	0.10
20	5.0	0.76	0.11	0.06	0.06	

Fig. 3 より, LEV と C_{80} には弱い負の相関関係が認められる。すなわち, 後期音エネルギーの初期音エネルギーに対する割合が大きいほど, LEV が強く知覚される傾向にあることが分かる。しかしながら, LEV と方向別後期音エネルギー率の間には相関は認められず, 両者の関係はこの結果からだけでは不明である。

3.2 考察

実験で得られた結果を, C_{80} 並びに方向別後期音エネルギー率の LEV に対する寄与の割合という視点から明確にするために, LEV に関する尺度値を目的変数, C_{80} 並びに LE_{late} , BE_{late} , VE_{late} を説明変数として重回帰分析を行った。算出した重相関係数並びに各物理パラメータに対する標準偏回帰係数を Table 2 に示す。また, 得られた回帰式から算出した LEV の尺度値と実験から得られた尺度値を比較したものを Fig. 4 に示す。重相関係数は 0.932 であり, 回帰精度は良好であるといえる。

Table 2 より, C_{80} の標準偏回帰係数 (絶対値) は 3 つの方向別後期音エネルギー率に比べて大きいことから, 後期

音エネルギーの初期音エネルギーに対する割合の LEV への寄与が最も大きいことが分かる。方向別後期音エネルギー率について見てみると, LE_{late} の標準偏回帰係数が BE_{late} , VE_{late} に比べて大きく, LE_{late} の LEV への寄与が最大であることが分かる。また, BE_{late} 並びに VE_{late} の LEV への寄与は, 各々, LE_{late} の約 62%, 35% 程度である。これらの結果は, C_{80} が一定という条件下で得ている結果⁴⁾ と符合するものである。

以上の結果から, 音場の LEV を把握するためには, 側方, 後方, 上方から到来する後期音の方向分布並びに後期音エネルギーの初期音エネルギーに対する割合を併せて検討する必要があることが確認された。

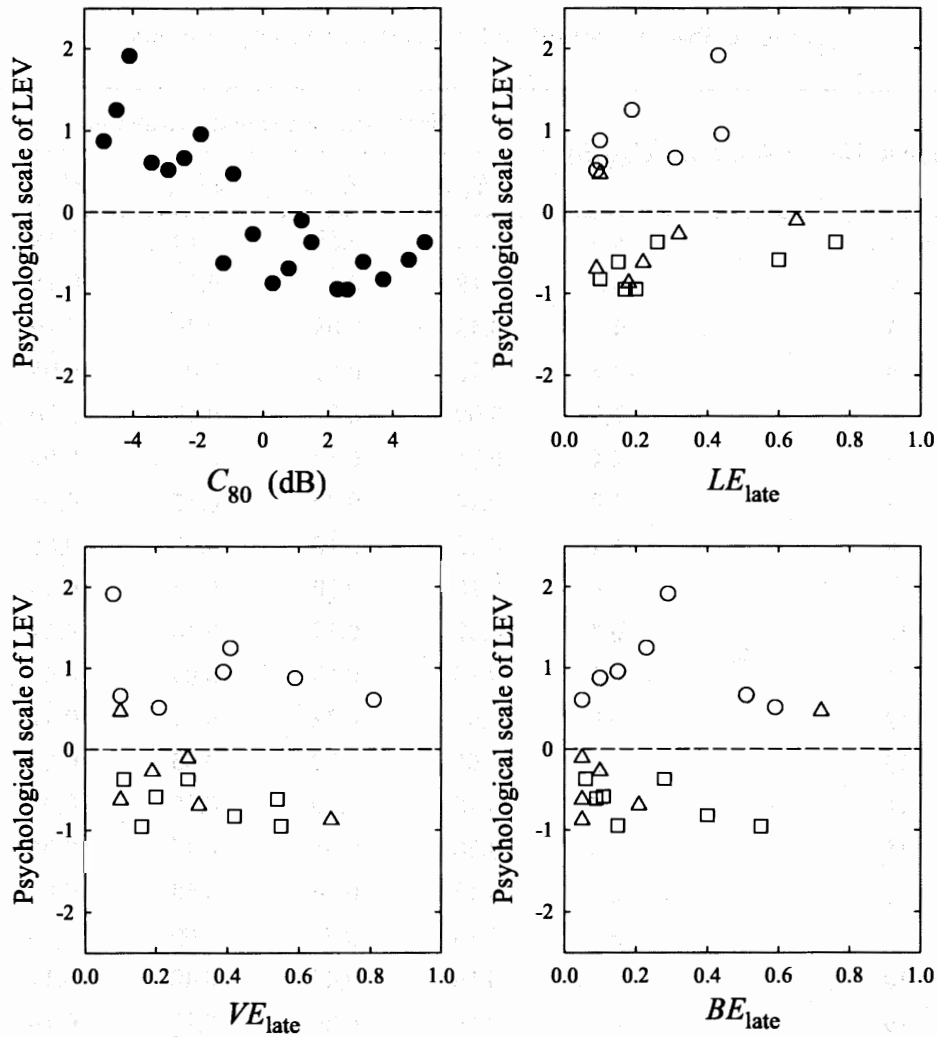


Fig. 3 Psychological scale of LEV, \circ : $-5 < C_{80} \leq -2$ dB, \triangle : $-2 < C_{80} \leq +2$ dB, \square : $+2 < C_{80} \leq +5$ dB.

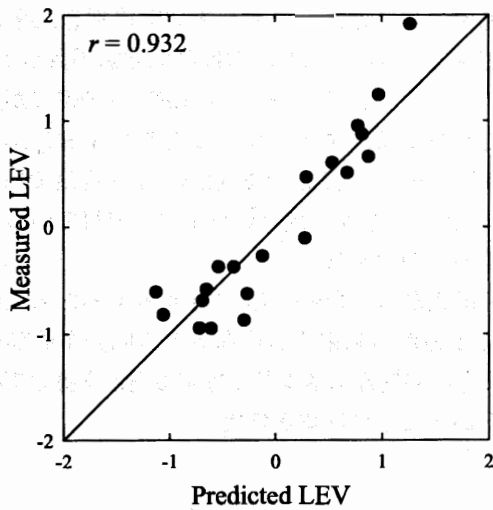


Fig. 4 Comparison between predicted LEV and measured LEV, r : correlation coefficient.

Table 2 The result of multiple regression analysis between perceived LEV and C_{80} and three directional late energy ratios, significant at $p < 0.005$.

Multiple correlation coefficient	Standard regression coefficients			
	C_{80}	LE_{late}	VE_{late}	BE_{late}
0.932	-0.967	0.630	0.223	0.393

4. まとめ

後期音の到来方向分布と C_{80} を変化させた刺激音場を用いた心理実験を行い、側方、後方、上方の方向別エネルギー率が LEV に与える影響について検討した。その結果、 C_{80} の LEV への寄与が大きいこと、後期音の方向別エネルギー率については側方後期音エネルギー率の影響が最も大きく、後方および上方後期音エネルギー率の寄与は側方の3割から6割であることを明らかにした。これらの結果は、コンサートホールにおける LEV の設計に際し、後期音エネルギー並びに後期音の到来方向分布を考慮する必要性を示すものである。

今後は、コンサートホール音場における後期音のエネルギー量とその到来方向分布を考慮した LEV の評価指標や、それを実際の音響設計へ反映させる手法について検討する必要があると考える。

謝辞

心理実験およびデータ整理には小田紘司、渡邊栄二(九州共立大学)両君の協力を得た。本研究は日本学術振興会科研費(No.12650606, 研究代表者 古屋浩)および2002年度日本建築学会九州支部奨励研究助成(受給者 和久田晃子)によるものである。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) J.S.Bradley and G.A.Soulodre: Objective measures of listener envelopment, J. Acoust. Soc. Am., 98, pp.2590-2597, 1995.
- 2) M.Morimoto and K.Iida: A new physical measure for psychological evaluation of a sound field: Front/back energy ratio as a measure for envelopment, J. Acoust. Soc. Am., 93, p.2282, 1993.
- 3) H.Furuya, K.Fujimoto, Y.J.Choi and N.Higa: Arrival direction of late sound and listener envelopment, Applied Acoustics, 62, pp.125-136, 2001.
- 4) A.Wakuda, H.Furuya, K.Fujimoto, K.Isogai and K.Anai: Effects of arrival direction of late sound on listener envelopment, Acoustical Science and Technology, 24, 2003. (to be printed.)
- 5) D.W.Robinson and L.S.Whittle: The loudness of directional sound fields, ACUSTICA, 10, pp.74-80, 1960.

(受理：平成15年6月12日)